

# 高转速气驱研抛装置设计及研抛特性研究\*

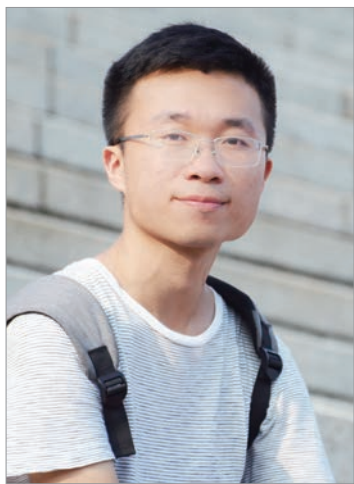
陈登铃, 彭云峰, 曾鑫龙

(厦门大学航空航天学院, 厦门 361102)

**[摘要]** 针对传统磨削中电主轴体积大和转速低的问题,设计了一种高转速、小体积气驱研抛装置。通过理论计算对轴承承载力进行了分析,并在有限元软件中建立了装置的仿真模型,对装置刚度、固有频率、临界转速等静动态特性进行了分析和校核。在此基础上,采用气驱研抛装置与柔性树脂磨头对某型发动机叶片用硬质合金进行了研抛试验,研抛后工件表面粗糙度  $R_a$  达到  $1.395\mu\text{m}$ ,研抛效果良好,证明该装置可用于高精度研抛。

**关键词:** 气驱; 高转速; 研抛; 有限元分析; 柔性

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.09.053



陈登铃

硕士研究生,主要研究方向为精密制造。

高速加工是当前先进制造领域的主要研究方向之一。主轴作为高速机床的核心部件之一<sup>[1-2]</sup>,其静、动态特性是影响机床加工精度的主要原因。主轴的驱动方式主要采用

电机驱动和气体驱动,当前,关于高速主轴的研究主要集中于电主轴的研究与设计。张晓阳等<sup>[3]</sup>将磁轴承的控制集成到现场可编程门阵列(FPGA)芯片上,并通过  $H_\infty$  算法控制,有效提高磁悬浮电主轴的动态性能。王红军等<sup>[4]</sup>研究了一种高速电主轴的动力学特性并分析了高速状态下轴承刚度软化后的主轴动态特性。赵斌<sup>[5]</sup>设计了一种高速水动主轴,并建立了相应结构模型。Wang等<sup>[6]</sup>将感应伺服电机和永磁同步电机结合在一个主轴系统中,提高了主轴的抗干扰特性。然而,传统的高速电主轴主要采用电机驱动,并依附于机床,体积较大且制造成本高。而在扭矩小、载荷低的研抛加工中,使用气驱主轴能有效降低成本<sup>[7]</sup>。

传统的主轴设计分析主要采用经验类比法进行,计算精度低<sup>[8]</sup>,随着人们的研究深入及计算机技术的发展,多种计算策略被应用到主轴

设计中,其中包含:有限元分析法、模态分析法、传递函数法等<sup>[9]</sup>。有限元分析作为一种高效而又准确的数值方法,在主轴的静、动态分析中得到广泛的应用。通过有限元分析软件,可以获取主轴的静、动态特性,对主轴的结构合理性进行分析与修正,提高主轴的加工特性。

因此,针对应用于工业机器人或机床的主轴研抛问题,本文设计了一种质量轻,体积小,转速高并装夹有柔性树脂半球形磨头的气驱研抛装置,建立了装置的三维模型,利用有限元软件 ANSYS WORKBENCH 对装置结构进行了静、动态特性的仿真,并通过试验对其研抛特性进行了研究。

## 气驱研抛装置设计

### 1 气驱研抛装置结构

气驱研抛装置的设计要点主要包含以下方面:(1)采用气体驱动,转速达  $10000\text{r/min}$  以上;(2)密

\* 基金项目:福建省科技计划项目(2017H0036)。

封性良好,防止加工过程中气体轴向泄漏;(3)便于安装与拆卸;(4)主轴夹持柄径可调;(5)装置刚度大于  $10\text{N}/\mu\text{m}$ 。

装置结构总体装配图如图1所示,由气动组件、夹持组件和密封组件3部分组成。作为一个完整的系统,其主要包含上、下外壳、驱动件、轴承、转轴、润滑系统、调压系统、冷却系统及可替换磨头等零部件。

装置在对曲面进行研抛时,磨头受到轴向力和径向力的共同作用,因此轴承选用能够同时承受轴向力和径向力的角接触球轴承。为使结构更加紧凑,同时保证角接触球轴承的高刚度,将轴承面对面安装并利用调整垫片对轴承预紧。在轴承与风轮的交接处配置骨架油封,防止高压气体将轴承的润滑油吹出,保持轴承的润滑状态,延长装置寿命。

## 2 研抛工具的选用

该装置通过连接件安装于六轴工业机器人末端,利用机器人多自由度的优势,对复杂曲面进行研抛。由于机器人属于高刚度、一般精度的设备,因此,选用具有一定柔顺性的磨头,能够避免刀具与工件的刚性接触,减少机器人自身精度带来的误差。树脂磨头相对于陶瓷磨头和合金磨头,具有“陷阱效应”等优势<sup>[10]</sup>,可以承受一定范围内的柔性变形,克服机器人刚度过大的问题,故而选用树脂磨头为装置的研抛刀具。综合考虑机器人曲面研抛的可达性,设计了一款柔性树脂磨头。磨粒采用碳化硅,基体为聚氨酯树脂,表面具有不同的粒度。详细参数如表1所示。

树脂磨头的磨粒处于半固着状态,且呈锥形。在研抛过程中,树脂磨头表面对硬质大颗粒有退让作用,可以降低硬质大颗粒对工件表面的划伤,提高工件表面质量。而柔性材料的高回弹性,让树脂磨头和工件之

间能够保持一定的抛光压力,提高抛光效率。同时,高回弹性也使得树脂磨头在加工过程中的实际加工深度小于预设的加工深度,故而对机器人的微小位置精度误差进行了补偿,实现系统的刚柔耦合,同时也实现了研抛效果。

## 3 工作原理

该装置的工作原理如下:将空压机接入进气孔中,由空压机产生的高压气体带动驱动件风轮高速旋转,风轮带动转轴,转轴再带动树脂磨头一起高速旋转。通过调整进气压和进气口,可调节装置转速与转向。

## 装置结构分析与仿真

### 1 轴承最大承载力分析

在高速研抛加工中,轴承是决定装置寿命和转速的重要零件。通常情况下,轴承越小、越薄,其能承受的最高转速越高,同时,轴承能承受的最大径向力和最大轴向力也相应降低。因此,轴承的选用要综合考虑装置转速和轴承刚度,选出最优方案。

对于高转速的轴承,由基本额定动载荷来计算轴承所能承受的最大轴/径向力。本装置选用的轴承为NSK 7900AC角接触球轴承,其基本额定载荷  $C_r=2.7\text{kN}$ ,接触角为  $25^\circ$  度,已知当量动载荷公式为:

$$P = \frac{f_n f_T}{f_h f_m f_d} C_r \quad (1)$$

式中,  $f_n$  为速度因数;  $f_T$  为温度因数;  $f_h$  为寿命因数;  $f_m$  为力矩载荷因数;  $f_d$  为冲击载荷因数。

其中,考虑到该装置的实际使用环境为高速、低振动、低冲击、常温的环境,取力矩载荷因数、冲击载荷因数、温度因数  $f_m=f_d=f_T=1$ ,设定轴承寿命为  $1000\text{h}$ ,速度为  $12000\text{r}/\text{min}$ ,查文献[11]得  $f_h=1.260$ ,  $f_n=0.141$ ,代入式(1)得:

$$P=0.112C_r \quad (2)$$

对于角接触球轴承,其轴向力和径向力与当量动载荷存在关系式:

$$P = \begin{cases} F_r + 0.92F_a & \left( \frac{F_a}{F_r} \leq 0.68 \right) \\ 0.67F_r + 1.41F_a & \left( \frac{F_a}{F_r} > 0.68 \right) \end{cases} \quad (3)$$

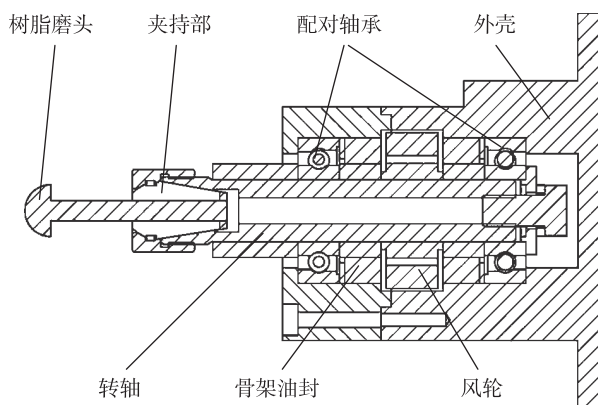


图1 气驱研抛装置装配图

Fig.1 Assembly drawing of pneumatic polishing device

表1 碳化硅树脂磨头参数

Table 1 SiC resin grinding head parameters

形状	直径/mm	粒度/目	碳化硅纯度/%
半球形	12mm	48 120	95

由式(2)与式(3)联立可得该轴承径向力和轴向力的关系式:

$$F_r = \begin{cases} -0.92F_a + P & \left( \frac{F_a}{F_r} \leq 0.68 \right) \\ -\frac{1.41}{0.67}F_a + \frac{P}{0.67} & \left( \frac{F_a}{F_r} > 0.68 \right) \end{cases} \quad (4)$$

以径向力  $F_r$  为纵坐标, 轴向力  $F_a$  为横坐标作图, 该角接触球轴承的最大受力区间范围如图2所示。

由图2可知, 该角接触球轴承所能承受的最大径向力和最大轴向力分别为 0.302kN 和 0.451kN。在研抛加工过程中, 当装置所受的径向力和轴向力位于图2的阴影区域中, 则轴承处于正常工作状态下, 能保证装置的高速旋转与高刚度。当轴承所受轴向力和径向力的关系超出图中阴影区域, 轴承将无法正常工作至预期使用寿命, 容易提前损坏。

## 2 装置刚度分析

主轴在受力时抵抗变形的能力, 即主轴的刚度是保证加工精度的基础。主轴在工作时受到研抛力的作用产生变形, 其所受外力包含轴向和径向两个方向。其中, 转轴作为装置的重要零件, 直接与刀具接触, 其刚度是影响装置刚度的主要因素。在研抛过程中, 转轴类似于悬臂梁结构, 转轴内锥面与筒夹的接触为面接触。

为了验证该装置的刚度, 在 ANSYS WORKBENCH 中建立转轴的有限元模型。其中转轴的材料选用合金钢, 具体材料参数如表2所示。

采用四面体单元结构进行自由网格划分, 应用 Patch Conforming 算法, 平滑过渡以忽略极小的细节如倒角, 网格划分效果如图3所示。

在研抛加工中, 快速抛光的抛光压力通常为 15kPa, 对于光学玻璃等材料抛光压力可达 50kPa。为了对装置的刚度进行校核, 设定仿真抛光压力为 100kPa, 并施加于转轴前端,

将角接触球轴承简化为弹性阻尼单元并施加约束, 仿真获得转轴位移变化量云图, 如图4(a)所示。可知转轴的最大变形量在转轴夹持刀具的锥孔一端, 变化值为 0.330 $\mu\text{m}$ , 该变形量处于合理范围之内。

下一步研究转轴刚度的具体数值, 由于转轴轴向刚度较大, 故忽略该方向极小变形产生的影响, 仅计算转轴的径向刚度。仿真条件设定为转轴在加工时的受力情况, 对其施加径向抛光压力 10N, 约束方法同上, 可以得到该转轴在静力下的位移变化量云图, 如图4(b)所示。可以看出, 转轴的最大变形点仍为转轴夹持刀具的锥孔一端, 变形量为

0.321 $\mu\text{m}$ 。可计算得到转轴的实际径向刚度:

$$K = \frac{F}{S} = \frac{10}{0.321} = 31.15 \text{N}/\mu\text{m} \quad (5)$$

在研抛和钻孔等低载荷、低扭矩的工况下, 装置刚度 >10N/ $\mu\text{m}$  即可满足使用要求。因此, 设计的转轴刚度符合使用要求。

## 动力学分析

为了优化装置结构动态特性, 防止共振、自激振荡现象产生, 故对转轴进行模态分析。由于轴系结构有着较强的对称性, 因此模态分析时需删除因有限元网格划分不对称而造成的模态振型重复结果, 模态分析

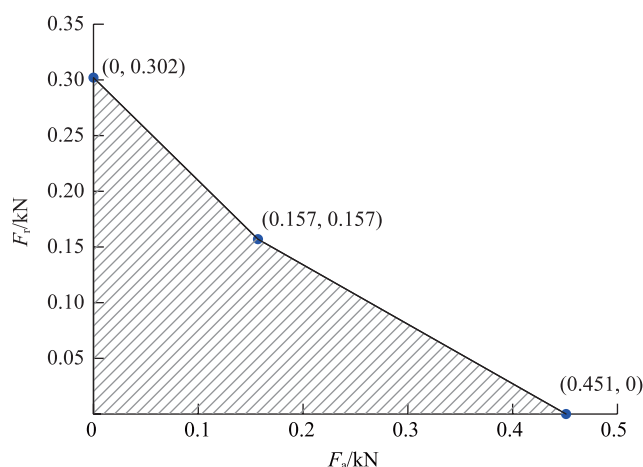


图2 角接触球轴承的最大受力区间图

Fig.2 Maximum force interval diagram of angular contact ball bearings

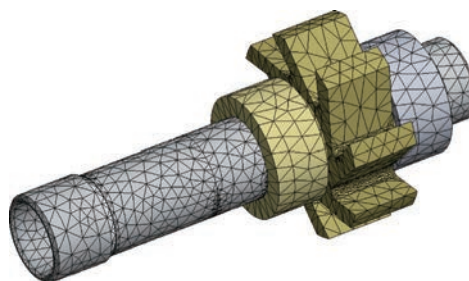


图3 转轴网格划分效果图

Fig.3 Diagram of meshing

表2 转轴材料参数

Table 2 Material parameters of rotary shafts

材料	弹性模量 $E/(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	泊松比 $\mu$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	抗拉强度 $R_m/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
合金钢	$2.07 \times 10^{11}$	0.254	7870	4.41



方法采用分块法( Block Lanczos ), 分析对转轴振动影响较大的前六阶模态。转轴的前六阶模态振型图如

图 5 所示。

其前六阶模态振型及模态频率 如表 3 所示。

风轮的临界转速与频率的关系为:

$$n=60f=60\times 9648=578880\text{r/min}$$

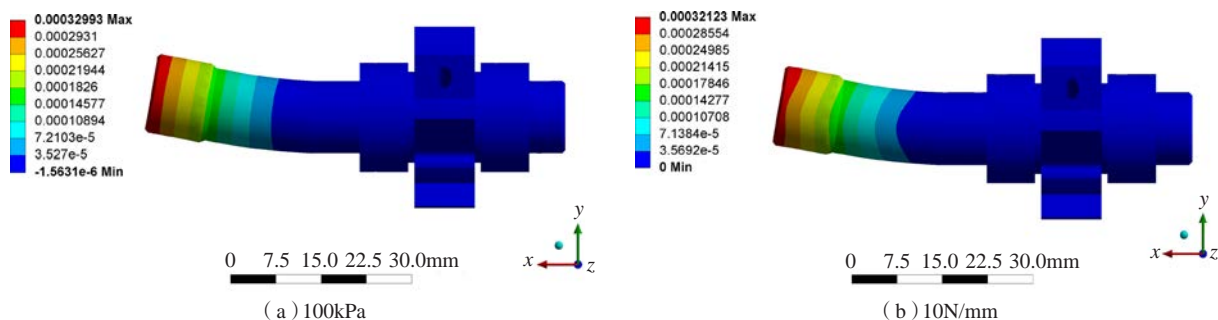


图4 不同受力下转轴的位移矢量云图

Fig.4 Displacements vector diagram of spindle under different force

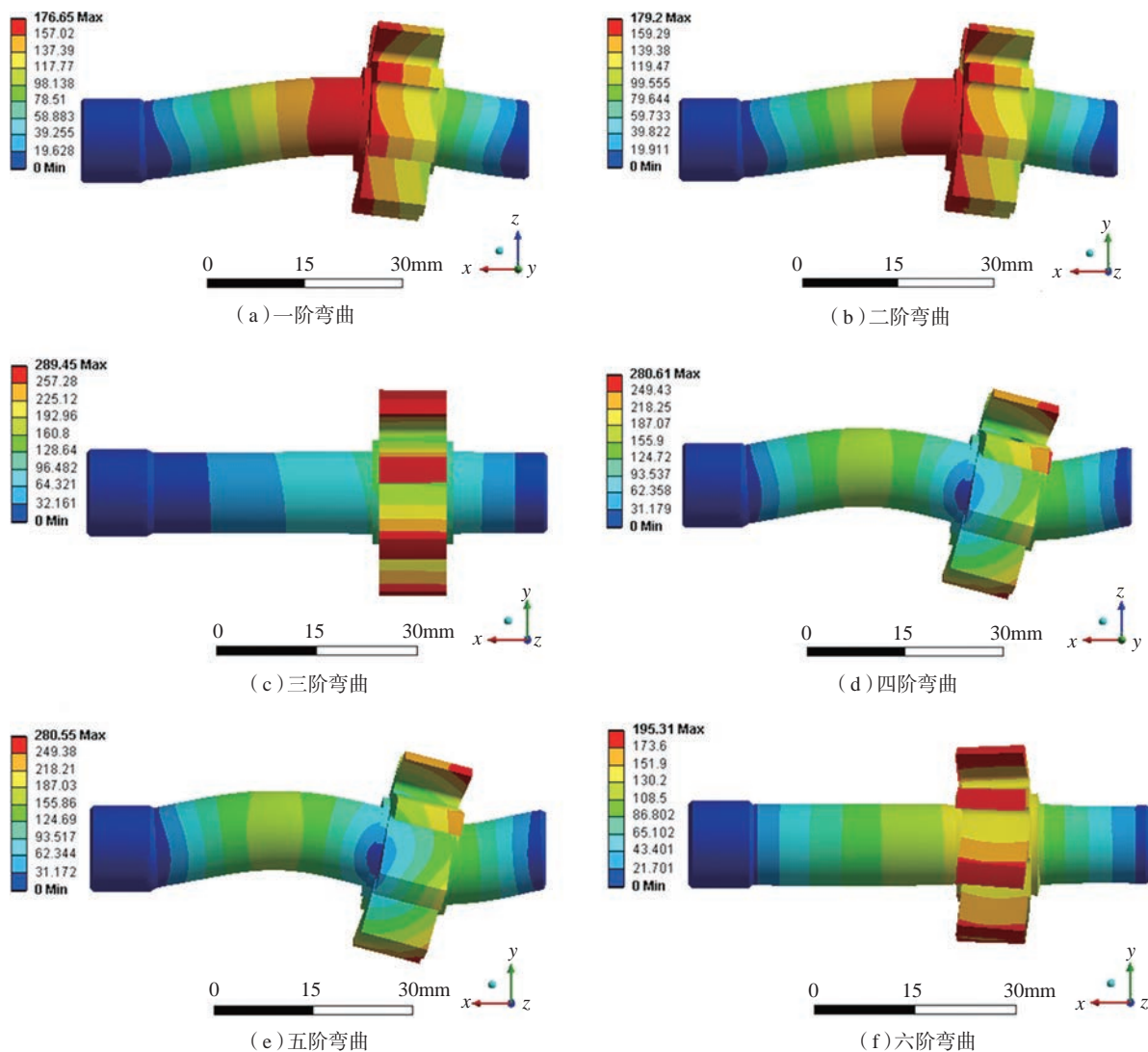


图5 转轴前六阶模态振型图

Fig.5 Diagram of top six order mode shapes

式中,  $f$  为频率, 单位为 Hz。

该装置的设计转速为 10000r/min, 远低于临界转速。且由仿真结果可知, 装置固有频率随着振型阶次的提高而不断提高。这是因为高阶振动需要的节点数多于低阶振动, 且阶次的提高使激发高阶振动的载荷能量逐渐减弱, 故而高阶振动的情况更难以发生<sup>[12]</sup>。因此, 该装置运转时能够有效避开共振区域, 保证装置的正常使用。

## 试验

### 1 试验平台的搭建

试验平台由 4 个模块组成: 机器人进给系统、气动系统、研抛系统和检测系统。其中, 机器人型号为 EPSON C4-A901, 加工工件为某型高温合金叶片, 固定于隔振台上。由水平仪调平工作平面, 再由 KEYENCE LK-G10 激光测距仪对气驱研抛装置的回转精度进行测量和校准。

打开气泵, 通过气动三联件的滤水、给油、调压作用后, 为气驱研抛装置输入 0.35MPa 的气压。待转速稳定后, 用胜利 VC6234P 光电转速仪测得装置转速为 12868r/min。再由控制器控制机器人按照指定的路径移动, 带动气驱研抛装置对工件进行研抛, 试验平台如图 6 所示。

### 2 加工特性试验

为分析气驱研抛装置的研抛特性, 设置了不同的磨头粒度, 采用单一变量法来研究不同磨头粒度下, 气驱研抛装置的研抛特性。研抛表面质量由三丰 SJ-210 粗糙度仪检测表面粗糙度, 多次检测取平均值, 以作为评定标准。试验条件及试验结果如表 4 所示。

加工后工件的表面形貌如图 7 所示, 从表 4 中可以看出加工工件在粒度 48 目的磨头研抛后的表面粗糙度  $R_a$  为 1.972 $\mu\text{m}$ , 相较于初始粗糙度  $R_a$  3.404 $\mu\text{m}$ , 降低了 1.432 $\mu\text{m}$ 。而在粒度 120 目的磨头研抛后, 工件表

面粗糙度  $R_a$  达到 1.395 $\mu\text{m}$ , 降低了 1.937 $\mu\text{m}$ 。相较于 48 目的磨头, 120 目研抛得到的工件表面质量更优。

## 结论

(1) 设计了一种高转速、小体积的气驱研抛装置, 对装置结构、轴承配置、轴承承载力等方面进行了分析计算。建立了装置有限元模型, 分析了装置刚度、固有频率、临界转

速等静态特性。静力学分析计算得到转轴径向刚度为 31.15N/ $\mu\text{m}$ , 满足设计要求; 模态分析得到转轴一阶频率为 9648Hz, 极限转速为 578880r/min, 远高于实际转速, 因此装置使用时可避开共振区。

(2) 设计的装置采用碳化硅树脂柔性磨头进行研抛试验, 在 0.35MPa 的气压下, 装置转速达到 12868r/min。研抛试验结果表明: 工

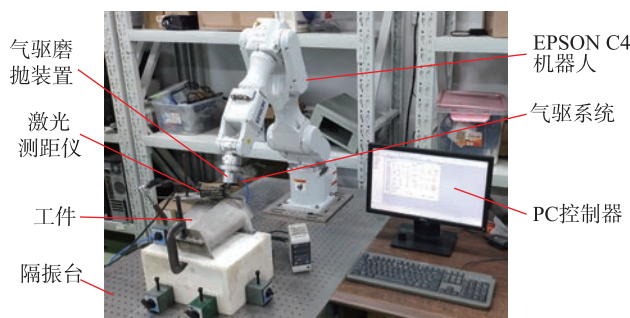
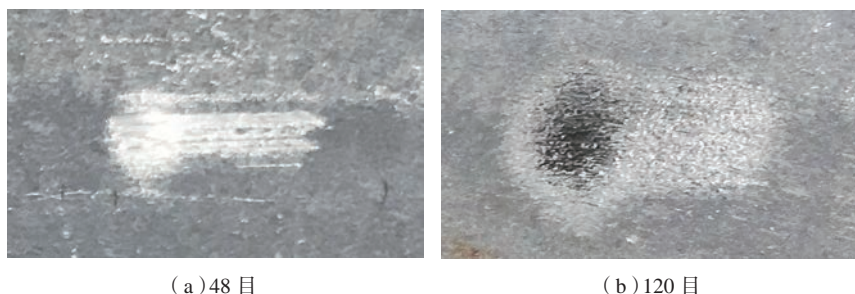


图6 研抛装置试验平台  
Fig.6 Experimental platform



(a) 48 目 (b) 120 目  
图7 不同粒度加工后的工件表面形貌  
Fig.7 Surface topography of workpiece after machining

表3 转轴1~6阶固有频率  
Table 3 1~6 order natural frequencies of rotating axes

阶次	频率 /Hz	振型	阶次	频率 /Hz	振型
1	9648	弯曲	4	23643	摆动
2	9653	弯曲	5	23658	摆动
3	10818	扭转	6	28932	扭转

表4 不同粒度磨头下研抛后粗糙度变化值  
Table 4 Roughness variation after polishing under different size grinding heads

粒度/目	加工前粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	加工后粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$			
		测量值1	测量值2	测量值3	平均值
48	3.404	2.002	1.937	1.977	1.972
120	3.332	1.397	1.368	1.420	1.395

件在粒度为 120 目的磨头研抛后表面粗糙度  $R_a$  达到  $1.395\mu\text{m}$ , 研抛效果良好, 故而设计的装置可用于高精度研抛。

## 参考文献

- [1] 吴玉厚. 数控机床电主轴单元技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- WU Yuhou. Motorized spindle unit technology of NC machine tool[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [2] ABELE E, ALTINTAS Y, BRECHER C. Machine tool spindle units[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 781–802.
- [3] 张晓阳, 谢振宇, 黄云龙, 等. 磁悬浮电主轴集成控制系统的动态性能研究[J]. 机械与电子, 2017, 35(4): 3–8.
- ZHANG Xiaoyang, XIE Zhenyu, HUANG Yunlong, et al. Research on dynamic performance of integrated control system of magnetic suspension spindle[J]. Machinery Electronics, 2017, 35(4): 3–8.
- [4] 王红军, 郑军, 赵川. 精密高速电主轴动力学特性及轴承刚度软化分析[J]. 航空制造技术, 2014, 57(4): 81–85.
- WANG Hongjun, ZHENG Jun, ZHAO Chuan. Study of dynamics characteristics and bearing stiffness softening for precision high-speed motor spindle system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(4): 81–85.
- [5] 赵斌. 机床高速水动主轴的设计及仿真[J]. 机械管理开发, 2014, 29(5): 18–20, 40.
- ZHAO Jian. Design and simulation of the hydrodynamic principal axis of high-speed machine tool[J]. Mechanical Management and Development, 2014, 29(5): 18–20, 40.
- [6] WANG Z, SOSHI M, YAMAZAKI K. A comparative study on the spindle system equipped with synchronous and induction servo motors for heavy duty milling with highly stable torque control[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 369–372.
- [7] AN C H, ZHANG Y, XU Q, et al. Modeling of dynamic characteristic of the aerostatic bearing spindle in an ultra-precision fly cutting machine[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 50(4): 374–385.
- [8] 徐化文. 电主轴单元结构及静动态性能的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- XU Huawen. The research on structure and static & dynamic characteristics of electric spindle unit[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010.
- [9] 张海杰. 轴承对高速电主轴静刚度影响的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- ZHANG Haijie. The reversion of influence to high speed electricity main axle static and dynamic stiffness by bearing[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.
- [10] 吴晓君, 陈竹, 周天择, 等. 弹性磨具高效磨抛 M300 钢曲面的接触特征研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(1): 171–177.
- WU Xiaojun, CHEN Zhu, ZHOU Tianze, et al. Experimental study on flexible abrasive grinding of M330 steel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(1): 171–177.
- [11] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- CHENG Daxian. Handbook of mechanical design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [12] 刘昌领, 陈建义, 李清平, 等. 基于 ANSYS 的六缸压缩机曲轴模态分析及谐响应分析[J]. 流体机械, 2012, 40(8): 17–21, 26.
- LIU Changling, CHEN Jianyi, LI Qingping, et al. Modal and harmonic response analysis of crankshaft of a six cylinders compressor by ANSYS[J]. Fluid Machinery, 2012, 40(8): 17–21, 26.

通讯作者: 彭云峰, 博士, 教授, 主要从事精密工程和智能制造方向研究, E-mail: pengyf@xmu.edu.cn.

# Design and Research on Polishing Characteristics of High Speed Pneumatic Polishing Device

CHEN Dengling, PENG Yunfeng, ZENG Xinlong

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

**[ABSTRACT]** A high speed and small volume pneumatic polishing device was designed in order to solve the problem that using large volume and low speed of motorized spindle in traditional grinding. The bearing's load capacity is analyzed by theoretical calculation, and the simulation model of the device is established by the finite element analysis (FEA) software. The static and dynamic characteristics of the device, such as stiffness, natural frequency and critical speed, are analyzed and checked. On this basis, the polishing experiment was carried out with flexible resin grinding tools, and the polishing characteristics of the device were preliminarily studied. The surface roughness of the workpiece is reduced to  $R_a 1.395\mu\text{m}$  after polishing. The results show that the device can be used for high precision polishing.

**Keywords:** Pneumatic; High speed; Polishing; Finite element analysis (FEA); Flexibility

(责编 古京)